

Conference Paper, Published Version

Brockmann, Herbert; Sörgel, Uwe; Havel, Patrick; Röpel, Lutz; Cramer, Michael; Schneider, Philipp

Multisensorales ingenieurgeodätisches Bauwerks- und -umfeldmonitoring

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107069>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Brockmann, Herbert; Sörgel, Uwe; Havel, Patrick; Röpel, Lutz; Cramer, Michael; Schneider, Philipp (2020): Multisensorales ingenieurgeodätisches Bauwerks- und -umfeldmonitoring. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 265-274.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Multisensorales ingenieurgeodätisches Bauwerks- und -umfeldmonitoring

Herbert Brockmann
Uwe Sörgel
Patrick Havel
Lutz Röpel
Michael Cramer
Philipp Schneider

Ein ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring ist eine Grundvoraussetzung zur Gewährleistung einer zuverlässig funktionsfähigen und sicheren Verkehrsinfrastruktur. In diesem Kontext hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt bearbeitet um verkehrsträgerübergreifend neue effiziente Monitoringlösungen und -strategien zu evaluieren und soweit sinnvoll praxistauglich weiterzuentwickeln.

Zur Erfassung von Bauwerksdeformationen bzw. Bodenbewegungen wurden Fragestellungen der elektronischen Neigungsmessung, UAV-gestützten Bild- und Laserdatenerfassung sowie satellitengestützten Radar-Technik bearbeitet.

Stichworte: Bauwerksmonitoring, Bauwerksumfeldmonitoring, Neigungsmesstechnik, UAV-basierte Bild- und Laserdaten, Persistent Scatterer SAR-Interferometrie

1 Motivation

Ein effizientes ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring unter Einbeziehung des jeweiligen Bauwerksumfeldes ist ein Fundament zur Gewährleistung einer zuverlässig funktionsfähigen und sicheren Verkehrsinfrastruktur. Vor diesen Hintergrund hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des BMVI-Ressortforschungsprogramms *Expertennetzwerk*, Themenfeld 3 *Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen* das Projekt *Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke* bearbeitet. Als Koope-

rationspartner wurde das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart zur Bearbeitung der fernerkundlichen Aufgabenstellungen eingebunden. Alle Aktivitäten wurden vom Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes unterstützt.

Am Beispiel der Schleusenanlage Hessigheim/Neckar wurden verkehrsträgerübergreifend drei neue Monitoringlösungen und -strategien evaluiert und soweit sinnvoll praxistauglich weiterentwickelt. Bis dato werden i.d.R. ausschließlich punktbezogene Techniken wie Tachymetrie oder Präzisionsnivelement für die Zwecke des Bauwerksmonitorings eingesetzt. Als potenzielle Alternativen bzw. Ergänzungen unter fachlichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurden betrachtet:

- bauwerksgebundene, hochgenaue elektronische Neigungsmesssysteme,
- flächenhaft und ultrahochauflösend arbeitende UAS (Unmanned Aerial System) ausgestattet mit digitalen Bild- und/oder Laser-Sensoren, und
- flächenhaft erfassende satellitengestützte Persistent Scatterer SAR-Interferometrie (PSI).

Eine Basis der geodätischen Aktivitäten waren die interdisziplinär abgestimmten bautechnischen Anforderungen. Darauf aufbauend wurden dann die im Folgenden aufgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzipiert und umgesetzt.

2 Das Projekt Schleusenanlage Hessigheim

Als Projektbasis wurde die Schleusenanlage Hessigheim/Neckar ausgewählt, die aus zwei Schleusenammern, einem mehrfeldrigen Wehr und einem ange-



Abbildung 1: Doppelschleuse Hessigheim

schlossenen Wasserkraftwerk besteht (Abb. 1). Der geologische Untergrund im Raum Hessigheim ist von Instabilitäten geprägt. Durch grundwasserbedingte Auslaugungsvorgänge können sich Hohlräume bilden, die wiederum zu Bodensenkungen führen (Kauther/ Schulze, 2015). Dies hat Auswirkungen auf die Stabilität der Schleusenanlage mit Bodensenkungen von

1 mm/a bis 3 cm/a im unmittelbaren Schleusenumfeld. Aufgrund des ANH-Bedarfes sollten die Projektergebnisse u.a. in die anstehenden Grundinstandsetzungs- und Modernisierungsaktivitäten einbezogen werden. Den entsprechenden drei Teilprojekten (TP) lagen folgende bautechnischen Anforderungen zu Grunde:

- Im TP 1 *Neigungsmesssysteme* wurden zwei Wehrpfeiler mit hochgenau, permanent, drahtlos und automatisiert arbeitende Neigungs- und Temperaturmesssensoren unterschiedlicher Bauart zweier Hersteller installiert und dahingehend untersucht, ob und wie mit diesen Systemen Neigungsänderungen kontinuierlich und hinreichend effizient erfasst werden können. Nachzuweisen waren Neigungsänderungen (Messtoleranz T) von $T = 2 \text{ mm}/10\text{m}$.
- Das TP 2 *UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning* widmet sich dem Gesamtbauwerk mit dem unmittelbaren Bauwerksumfeld. Mittels ultrahochauflösender UAV-gestützter digitaler Bild- und Lasermessdaten sollten Gelände- und Differenzenmodelle als 10 cm-Quadratgitter mit objektbezogener Stützpunktklassifizierung abgeleitet werden. Nachzuweisen waren Höhenveränderungen von $T \leq 1 \text{ cm/a}$ bei eindeutiger Objektpunktidentifizierung.
- Im TP 3 *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* wurde zusätzlich das erweiterte Bauwerksumfeld einbezogen. Es sollten ebenfalls Höhenveränderungen von $T \leq 1 \text{ cm/a}$ erfasst werden. Dazu waren die Potenziale der Synthetic Aperture Radardaten (SAR-Daten) des Sentinel-1-Satelliten (STN-1) des europäischen Erdbeobachtungsprogramms *Copernicus* bei kostenfreier Datenverfügbarkeit mit denen des deutschen kommerziellen TerraSAR-X-Satelliten (TSX) gegenüberzustellen.

2.1 TP 1 – Neigungsmesssysteme

Mit dem Ziel, möglichst langzeitliche Neigungsänderungen zu erfassen, wurden exemplarisch zwei Wehrpfeiler mit redundanten Neigungsmesssystemen ausgestattet. Kontrollmessungen mit höherer Genauigkeit, Faktor 10^{-1} , waren realisierbar.

Für einen Vergleich hinsichtlich qualitätsspezifischer Kriterien wurden unterschiedliche Neigungssensoren zweier Herstellern (Wyler, 2020; PC, 2020) eingesetzt, die kontinuierlich Messwerte erfassen. Zum Einsatz kamen umschlagbare Zwei-Achs-Sensoren, die es durch die „Zwei-Lagen-Messung“ ermöglichen systematische Abweichungen nahezu vollständig zu eliminieren (z.B. Sensordriften). Des Weiteren wurden nicht umschlagbare Ein-Achs- und Zwei-Achs-Sensoren unterschiedlicher Preiskategorien eingesetzt (Abb. 2).

Ergänzend sind Temperatursonden in die Betonwände der Pfeiler eingebracht worden, um die Abhängigkeiten zwischen Neigungen und Temperaturen einzubeziehen (Abb. 3). Die Datenauswertung und Zeitreihenanalyse erfolgte mit zwei kommerziellen Softwareprodukten (GKSPRO, 2020; jBEAM, 2020). Da diese nicht alle erforderlichen Funktionalitäten bereitstellten, erfolgte darüber hinaus eine bedarfsbezogene Programmierung in Python.

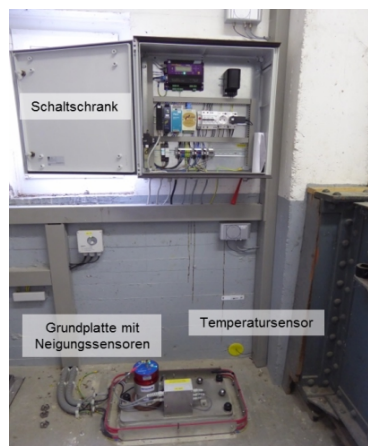


Abbildung 3: Neigungsmesssystem



Abbildung 2: Grundplatte mit umschlagbaren [1], nicht umschlagbaren [2a, 2b] Neigungssensoren und manuell aufgesetztem Präzisionsneigungsmesser höherer Genauigkeitsklasse [3]

Laborkalibrierungen zeigten, dass nur die Wyler-Sensoren bei der Messwert-erfassung die einzuhaltende Messunsicherheit (GUM, 2008) von $u = 0,01$ mm/m weitestgehend erreichten. Zwischen den Neigungswerten und Temperaturen bestanden hohe Korrelationen (Abb. 4), insbesondere hervorgerufen durch den Tagesgang der Sonne.

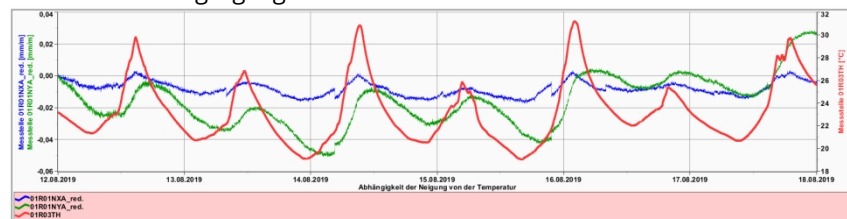


Abbildung 4: Korrelationen zwischen Neigung und Temperatur; **umschlagbarer Sensor**, **nicht umschlagbarer Sensor**, **Betontemperatur**

Die Neigungsmesstechnik ist grundsätzlich für die Detektion von kleinsten Veränderungen im 1/10 mm-Bereich geeignet. Bei der Auswahl der Sensoren hat sich gezeigt, dass die umschlagbaren Sensoren wesentlich genauer arbeiten ($u < 0,1$ mm/m) als die nicht umschlagbaren Sensoren ($u > 0,3$ mm/m). Zur Qualitätssicherung und Plausibilisierung sind redundante Systeme einhergehend mit einer ständigen Kontrolle aller Komponenten geboten. Nur durch eine bedarfsgerechte Analyse der Messdaten und abgeleiteten Zeitreihen stehen belastbare Ergebnisse zur Verfügung.

2.2 TP 2 - UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning

Die Potenziale von UAV-gestützten Bild- und Lasersensoren waren mit dem Ziel eines flächenhaften Höhenbewegungsmonitorings herauszuarbeiten. Dabei sollten methodische Ansätze, wenn sinnvoll und möglich, optimiert werden.

Es wurden kampagnenbezogen ultrahochauflösende digitale PhaseOne-Kameras iXU-RS 1000 bzw. iXM 100 (PhaseOne, 2020) mit jeweils 100 MPix Bildauflösung eingesetzt. Realisiert wurde damit eine Bodenauflösung von 3,7 mm. Parallel erfolgten Laserdatenerfassungen mit einem RIEGL VUX-1LR (Riegl, 2019) mit einer Rate von bis zu 750.000 Messungen/Sekunde (Abb. 5). Um verlässliche Vergleiche der Flugepochen zu ermöglichen galt es zudem hohe ingenieurgeodätische Ansprüche an die absolute Georeferenzierung der UAV-Bilder und Laserdaten zu stellen. Dazu waren aufwendige, tlw. dauerhaft vermarktete Passinformationen, höhenmäßig mit einer Messunsicherheit von $u = 1$ mm, zu bestimmen.

Die vorgesehenen Auswertungen konnten bislang noch nicht vollständig abgeschlossen werden. Die bisherigen Auswertungen der Bilddaten einzelner Epochen ergaben im Vergleich zu den Kontrollpunkten maximale Abweichungen unter 7 mm. Im unmittelbaren Bauwerksbereich lagen sie unter 2 mm. Vergleichbare Auswertungen der Laserdaten ergaben maximale Abweichungen unter 5 mm. Aus den Einzelepochen als digitale Oberflächen- und Geländemodelle sind final Differenzenmodelle zu berechnen, um letztendlich mögliche Höhenveränderungen anzuzeigen. Dabei ist obligatorisch, dass die Aussagekraft der ermittelten Differenzen von der möglichen Objekt- bzw. Objektpunktidentifizierung abhängig ist. Diesem Sachverhalt tragen die exemplarischen Aussagen der Abb. 6 Rechnung. Im direkten Schleusenbereich liegen die ermittelten Höhendifferenzen zwischen den Epochen bei eindeutiger Objektidentifizierung unter 1 cm.

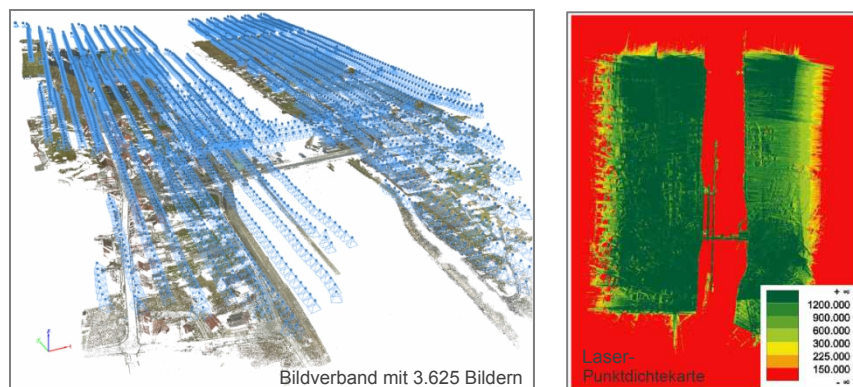


Abbildung 5: Charakteristische Befliegungsparameter in Hessigheim



Abbildung 6: Differenzenmodell aus Laser-Oberflächendaten, Epochen 03/2019 - 11/2018.

Des Weiteren s. Cramer et al. (2019). Um fachlich und wirtschaftlich abschließende Aussagen treffen zu können, stehen u.a. noch Aktivitäten zur epochenweisen Fusionierung der 3D-Punktwolken aus den Bild- und Laserdaten an.

2.3 TP 3 - Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

Ein wesentlicher Betrachtungsgegenstand war, ob sich PSI für das Bauwerksmonitoring auch auf der Grundlage der STN-1-Daten (Copernicus, 2020) einsetzen lässt. Da diese SAR-Daten eine vergleichsweise geringe räumliche Auflösung aufweisen (verfügbar waren nur Daten mit einer räumlichen Auflösung von 5 m x 20 m), stellt sich die Frage, ob speziell gebäudespezifisch

sche Deformationen zuverlässig erkannt werden können. Als Vergleichsgrundlage wurde eine Untersuchung der hochaufgelösten SAR-Daten (1 m x 1 m) der kommerziellen TSX-Mission (DLR, 2020) herangezogen.

Bei der SAR/PSI-Datenprozessierung werden relative Bewegungsmuster erfasst. Darum war es zielführend, Möglichkeiten der Georeferenzierung über entsprechend eindeutige Reflektoren (z.B. Corner-Reflektoren) zu realisieren. Wenn Radarbeobachtungen aus zwei Blickrichtungen (Satellitenbahnen Ascending, Descending) vorliegen, können Vertikal- und Horizontalbewegungen berechnet werden.

Eine wichtige Rolle spielt die Verfügbarkeit von SAR-Daten. Die STN-1-Daten haben den Vorteile einer höheren Verfügbarkeit (Abb. 7).

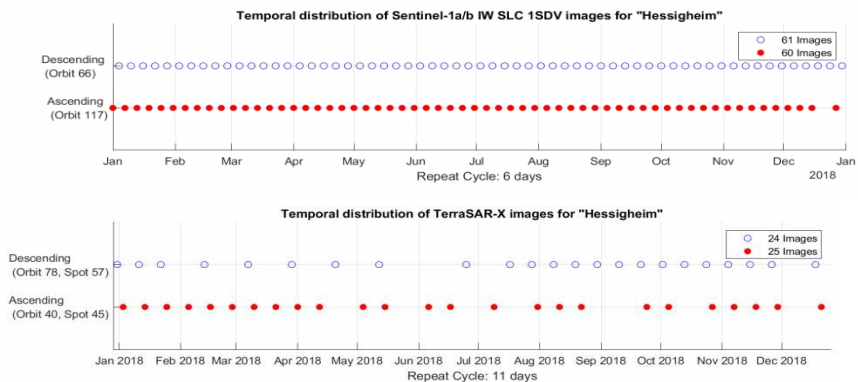


Abbildung 7: Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Radarbilder im Jahr 2018

So erlaubt die STN-1-Satellitenkonstellation alle 6 Tage eine regelmäßige, flächenhafte Erfassung. Hingegen sind hochauflösende Systeme wie TSX nicht für eine wiederholte vollständige Abdeckung der Erde im dichten zeitlichen Abstand konzipiert. Die Erfassungen müssen aus kommerziellen Gründen beauftragt werden, sodass Konkurrenzsituationen zwischen Nutzern unvermeidbar sind. Daher kam es zu den Lücken, statt der theoretisch möglichen Anzahl von 33 Aufnahmen in 2018 (Satellitenzyklus von 11 Tagen) wurden nur 24 bzw. 25 realisiert. Letztendlich wurden Bildstapel pro Jahr ausgewertet.

Ein wesentliches Ergebniskriterium ist die auflösungsabhängige Punktdichte der eindeutigen Reflektoren (Persistent Scatterer, PS), denn nur bei hoher Punktdichte können lokale Deformationsprozesse aufgezeigt werden. Die geringe Anzahl mit 450 PS-Punkten bei STN-1 im Testgebiet gegenüber 24.500 bei TSX zeigen schon ein kaum gegebenes STN-1-Nutzungspotenziale,

erst recht in dem hier vorliegenden ländlichen Raum an (Abb. 8). Aus diesem Grund war es nur für die TSX-Analyse sinnvoll, Vertikalbewegungen abzuleiten (Abb. 9).

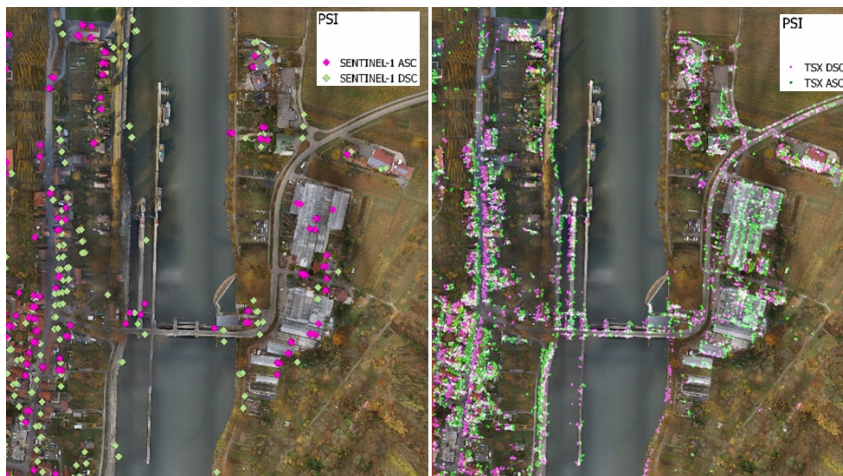


Abbildung 8: Ausschnitt STN-1 und TSX-Punktdichten **Ascending** / **Descending**

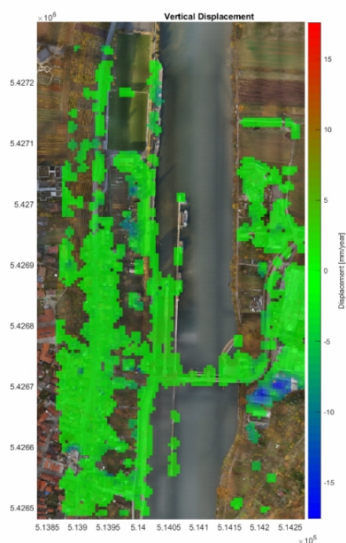


Abbildung 9: Höhenbewegungen, interpoliert
auf ein 5 m-Quadratgitter

Die Ergebnisse zeigen signifikante Höhenveränderungen von ca. 10 mm/a in Teilbereichen des Projektgebietes mit einer Messunsicherheit $u = 2\text{mm/a}$ an. Auswertungen der Bundesanstalt für Wasserbau (Sky-Geo/BAW, 2015) und des ANH bestätigen diese Ergebnisse.

3 Fazit

Die ausgeführten Arbeiten zeigen aussagestarke Ergebnisse an und sind verkehrsträgerübergreifend gültig. Hinsichtlich eines möglichen Praxiseinsatzes sind die Beachtung der fachlichen Nutzeranforderungen und wirtschaftlichen Möglichkeiten obligatorisch. Vor diesem Hintergrund müssen die Ergebnisse betrachtet werden.

Es stehen ausgewählte Neigungsmesssysteme mit zugehörigen Temperatursensoren zur Verfügung, die zuverlässig und belastbar Messdaten kontinuierlich hochgenau und -frequent webgestützt und damit ortsunabhängig bereitstellen. Fundamental ist eine bedarfsgerechte Auswahl der Systeme. So können die Möglichkeiten nur mit zweiachsigen umschlagbaren, aber höherpreisigen Systemen ausgeschöpft werden, um Neigungsänderungen von 0,2 mm/m nachzuweisen. Der Einsatz im Wirkbetrieb an Wasserbauwerken wird zurzeit vorbereitet.

Die flächenhafte hochgenaue Erfassung von Höhenbewegungen von 1 cm/a mittels UAV-gestützter Kamera- und Lasersysteme, einschl. der am Boden zu bestimmenden Passinformationen, ist möglich, aktuell aber noch sehr aufwendig, vor Ort und in der Auswertung. Fachliche und wirtschaftliche Optimierungspotenziale sind offensichtlich. Vor diesem Hintergrund werden insbesondere Weiterentwicklungen zum gleichzeitigen Einsatz beider Sensoren mit einem UAV und zur Fusionierung aller Daten zu einem Nutzerprodukt forciert.

Die STN-1-Daten (5 m x 20 m) sind nicht für das hochgenaue Bauwerksmonitoring geeignet. Optimal sind Daten in der Auflösung von 1 m x 1 m. Welche Potenziale mit den grundsätzlich erfassbaren STN-1-Daten von 5 m x 5 m verbunden sind, ist erst zielführend herauszuarbeiten, wenn sie auch in zeitlich ausreichender Frequenz von der Europäischen Raumfahrtagentur bereitgestellt werden. Davon kann derzeit nicht ausgegangen werden. Inwieweit sich die STN-1-Daten für einen großräumigen Überwachungsdienst für Verkehrsinfrastrukturobjekte nutzen lassen, ist BfG-Gegenstand der aktuell begonnen 2. Expertennetzwerkphase.

4 Literatur

- Copernicus (2020): <https://www.d-copernicus.de/daten/>, 14.01.2020
- Cramer, M. et al. (2019): Potenzial ultrahochauflösender und -genauer UAV-basierter 3D-Datenerfassung, Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28, 2019
- DLR (2020): <https://www.dlr.de/content/de/artikel/missionen-projekte/terrasar-x/terrasar-x-erdbeobachtungssatellit>, 14.01.2020
- GKSPRO (2020): <http://gks.vision/>, 14.01.2020
- GUM (2008): ISO/BIPM-Leitfaden: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen), Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008
- jBEAM (2020): <https://www.amsonline.de>, 14.01.2020
- Kauther, R.; Schulze, R. (2015): Satellitengestützte Radarinterferometrie – ein neues Werkzeug für die Geotechnik, BAW-Kolloquium „Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau 10./11.02.2015
- PC (2020): <https://position-control.de>, 14.01.2020
- PhaseOne (2020): https://industrial.phaseone.com/iXU_camera_system.aspx, 14.01.2020
- Riegl (2019): http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RiCOPTER_Brochure_2019-09-02.pdf, 14.01.2020
- SkyGeo/BAW (2015): *TerraSAR-X SpotLight analysis of Hessian, Besigheim and Felsengärten Final Report*. P. Mahapatra, E. Aguilera, P. Mahapatra (SkyGeo), R. Schulze, R. Kauther (BAW), 2015
- Wyler (2020): <https://wylerag.com>, 14.01.2020

Autoren:

Herbert Brockmann
Patrick Havel
Lutz Röpel

Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel
Dr.-Ing. Michael Cramer
Philipp Schneider

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat Geodäsie & Fernerkundung
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Institut für Photogrammetrie (ifp)
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart

Tel.: +49 261 1306 0
Fax: +49 261 1306 5088
E-Mail: brockmann@bafg.de
havel@bafg.de
roepel@bafg.de

Tel.: +49 711 685 83336
Fax: +49 711 685 83297
E-Mail: Uwe.Soergel@ifp.uni-stuttgart.de
Michael.Cramer@ifp.uni-stuttgart.de
Philipp.Schneider@ifp.uni-stuttgart.de